

白亜紀海洋無酸素事変と炭酸塩プラットフォームの“溺死”

佐野晋一

福井県立恐竜博物館

Cretaceous oceanic anoxic events and their relations to carbonate platform drowning episodes

Shin-ichi Sano

Fukui Prefectural Dinosaur Museum, Terao, Muroko, Katsuyama, Fukui 911-8601 (ssano@dinosaur.pref.fukui.jp)

Abstract. Cretaceous greenhouse conditions were characterized by the expansion of Tethyan carbonate platforms on the continental shelf and by widespread deposition of organic-rich sediments representing “oceanic anoxic events (OAEs)”. Many Cretaceous carbonate platforms were temporarily drowned several times, indicating that environmental factors frequently stressed carbonate factories on these platforms. Nine global Cretaceous episodes of carbonate platform drowning are recognized. Recent bio- and chemostratigraphic studies revealed that three episodes were probably coincident with OAEs and with events of global carbon accumulation: the mid-Valanginian carbon isotope event, the mid-Aptian event (OAE1a), and the Cenomanian-Turonian boundary event (OAE2). These three breaks in carbonate platform development were associated with mass extinctions of carbonate platform biota, such as rudists, benthic foraminifers and calcareous algae. The major changeovers of Cretaceous hermatypic fossil assemblages came during the periods following these biotic crises. These lines of evidence suggest some causal relationships among some OAEs, carbonate platform drowning episodes and extinctions of carbonate platform biota.

Key words: oceanic anoxic event, carbonate platform, Cretaceous, drowning, extinction, hermatypic organism

はじめに

海洋無酸素事変 (Oceanic Anoxic Event(s), 以下 OAE(s) と表現する) は、有機炭素に富む黒色頁岩が汎世界的に堆積したイベントで、酸素に乏しい水塊が地球的な規模で拡大したことを示唆する。また、大量の有機物の堆積に伴って、ほとんどの OAEs において、炭酸塩岩や有機物の炭素同位体比が重くなる方向 (positive: 正) にシフトしたことも知られている (Schlanger and Jenkyns, 1976; Jenkyns, 1999)。一方、セノマニアン/チューロニアン境界 (以下 C/T 境界とする) でも、OAE 2 とよばれる無酸素事変が生じているが、ここでは海洋無脊椎動物の絶滅も起こった。一例を挙げると、アメリカの西部内陸海路 (Western Interior Seaway) において、軟体動物の約 50% の種が絶滅している (Elder, 1989)。すなわち、OAEs は生物事変としても重要である。

OAEs の研究は、これまで微化石からなる炭酸塩堆積物や碎屑岩の地層を中心に進められてきた。しかし、浅海相の代表である炭酸塩プラットフォームにもその影響が及んだ可能性が想定される。いくつかの研究では、OAEs とほぼ同時期にプラットフォームの形成が中断されたり、造礁生物の交替が起こったことが指摘されている (Scott, 1995; Höfling and Scott, 2002 など)。しかし、炭酸塩プラットフォームの盛衰と OAEs との因果関係は必ずしも明らかになっていない。その理由として第一に挙げられるのは、炭

酸塩プラットフォームには黒色泥岩層のような貧酸素環境で形成された堆積物がみつからないことである。また、浮遊性微化石やアンモナイトなどの示準化石がほとんど産出しないため、化石層序年代を容易に決定することができず、炭酸塩プラットフォームで生じた事変と OAEs の相互関係を明確にしがたいことが挙げられる。さらに、炭酸塩プラットフォーム堆積物は海水面の変動により海面上に容易に露出するため (干出という)、堆積の中断、続成作用による溶解や生成物の付加がしばしば認められ、得られたデータに時間のギャップや初生的な情報の損失があることも、両者の関係を理解しがたくしている。

そこで、本論では、白亜紀において炭酸塩プラットフォームの形成が中断した時期と OAEs の時期が一致しているかどうかを評価し、今後の OAEs と浅海性炭酸塩岩の事変の関連性を解明するための一助としたい。

白亜紀の炭酸塩プラットフォームの“溺死”

白亜紀は温暖で海水準が高く、世界各地に大規模な炭酸塩プラットフォームが発達した時代である (Simo *et al.*, 1993)。しかし、白亜紀全体を通してみると、炭酸塩プラットフォームは常に発達していたわけではなく、拡大と縮小を繰り返していたことがわかる (図 1)。炭酸塩プラットフォームの発達はさまざまな要因によって妨げられるが、プラットフォームの浅海性の炭酸塩堆積物が微化石を中心

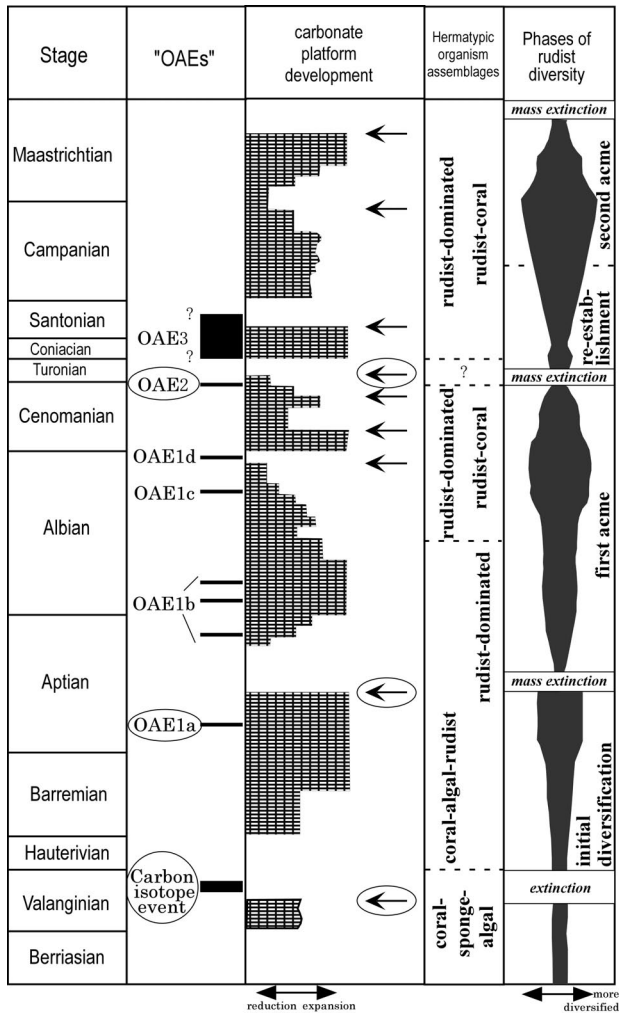


図1. 白亜紀における海洋無酸素事変(OAEs)と考えられるイベントと炭酸塩プラットフォームの消長, 造礁生物相の時代的変遷との比較(Höfling and Scott, 2002を改変). バランギニアン炭素同位体イベント, OAE1a, OAE2は, 炭酸塩プラットフォームの溺死および造礁生物相の交替とほぼ同時に起こった可能性がある. バランギニアン炭素同位体イベントおよびOAEsの時期はChannell *et al.* (1993), Leckie *et al.* (2002), Arthur *et al.* (1990)に基づく. 矢印は炭酸塩プラットフォームの汎世界的な溺死が生じた時期を示す(Scott, 1995). 主要な造礁生物群集の変化と厚歯二枚貝の絶滅は, それぞれScott (1995)およびRoss and Skelton (1993), Masse (1995)に基づく.

とする遠洋性堆積物に覆われるという現象がしばしば観察される. この現象は“溺死 (drowning)”とよばれ, 浅海性の炭酸塩プラットフォームの発達ที่止まり, 急速に沈水して生じたことを意味する (Schlager, 1981など). プラットフォームの溺死は, 海水準の上昇や堆積盆の沈降の速度に, プラットフォームの上方への成長が追いつけない場合に起こる. Schlager (1981) は, “健全 (healthy)”な炭酸塩プラットフォームの成長速度は年間約1ミリで, 第2・第3オーダーの海水準変動の上昇速度 (年間数~250マイクロ) をはるかに上回っており, 溺死を説明するためには, プラットフォームの成長速度の減少や短期間で急激な海水準上昇などが必要であると指摘した.

特に, 白亜紀は大規模な炭酸塩プラットフォームが形成

される一方, 頻繁に炭酸塩プラットフォームが溺死した時期としても注目される (Simo *et al.*, 1993). 白亜紀には, 汎世界的な炭酸塩プラットフォームの溺死が, バランギニアン後期, アプチアン中頃, アルビアン後期, セノマニアン中頃, セノマニアンの末期, チューロニアン中頃, サントニアン中頃, カンパニアン末期, マーストリヒチアン最後期の合計9回にわたって起こったことが知られている (図1). この中で, マーストリヒチアン最後期のほか, バランギニアン後期, アプチアン中頃, アルビアン後期, C/T境界の溺死が比較的大規模なものとされる (図2).

この溺死の原因を説明するため, 様々な仮説が挙げられており (たとえば井龍・松田, 1999; Jenkyns and Wilson, 1999など), それらは以下のようにまとめることができる.

1) 海水準上昇説: 太平洋のギョー (平頂海山) は白亜紀に溺死した炭酸塩プラットフォームの典型例とされている (Schlager, 1981). ギョーの研究の初期には, 通常海水準の上昇でプラットフォームの溺死が生じたと考えられていたが (Matthews *et al.*, 1974など), この見解はSchlager (1981) の指摘以降はほとんど支持されていない.

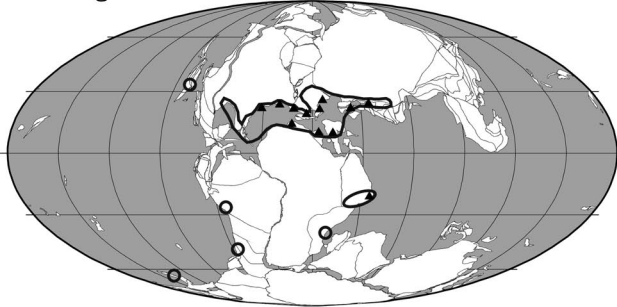
2) 高緯度成長阻害説: ハワイー天皇海山列の生物礁の検討から, 北緯29度以北では礁が溺死していることが示された (Grigg, 1982). 一般に, 炭酸塩プラットフォームの炭酸塩の生産量は高緯度になると小さくなるため, プラットフォームの成長速度が海水準の上昇量 (もしくは地殻の沈降量) に追いつけなくなり, プラットフォームは溺死する. 地質時代においても, プレート運動によるプラットフォームの高緯度への移動は溺死の要因になりうる.

3) 干出ダメージ説: 溺死したプラットフォーム堆積物の最上部付近にカルスト化を被った証拠が見出されることにより, プラットフォームの干出が溺死の要因になったとする説である (Winterer and Metzler, 1984; Sager *et al.*, 1993; Grötsch *et al.*, 1993など). この説は, 最初に海水準の低下によってプラットフォームが干出し, 炭酸塩堆積物の生産の場が縮小したため, プラットフォームはその後の海水準上昇に同調して成長することができず, 溺死したとするものである.

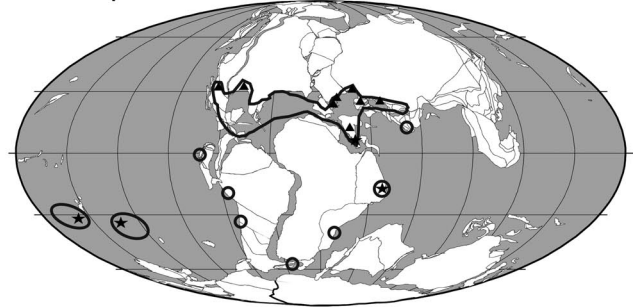
4) 栄養塩過多説: OAEsの際に, 酸素に乏しく栄養塩に富んだ深層水が上昇する, もしくは陸から多量の栄養塩が流入することによって, 浅海域が栄養塩過多の状態となり, プラットフォームの形成が阻害され溺死が生じたという説が示された. この説は, OAEsが提唱されて以来, 広く支持されてきた (Hallock and Schlager, 1986; Jenkyns, 1991; Weissert *et al.*, 1998など).

5) 墓場説: Wilson *et al.* (1998) は, 溺死したギョーの最上部から採取された炭酸塩堆積物および方解石セメントの酸素・炭素の同位体比から溺死前の干出が大規模ではなかったとし, 干出ダメージ説を否定した. また, ギョーの溺死の時期が主要なOAEsの時期と一致せず, しかもOAE1aを生き延びたギョーも存在することから栄養塩過多説も否定した. そのかわり, 彼らは白亜紀中頃から始新世

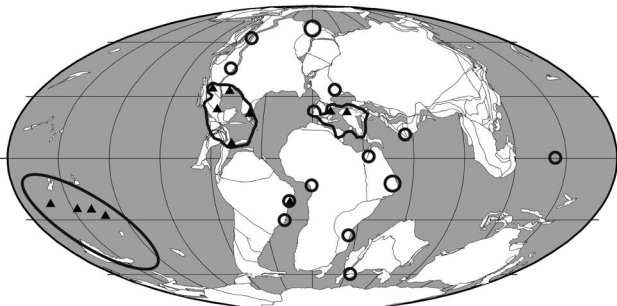
A: Valanginian



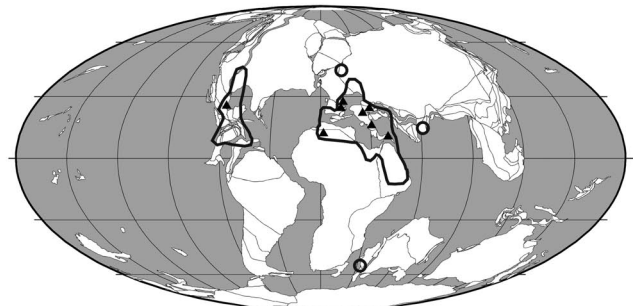
B: mid-Aptian



C: late Albian



D: Cenomanian-Turonian boundary



▲ drowned carbonate platforms ★ surviving carbonate platforms 〇 distribution of biota in organic carbonate buildups

図2. 炭酸塩プラットフォームの溺死が生じた場所. 古地理図の作成には“ODSN プレートテクトニック復元サービス (<http://www.odsn.de/>)”を利用. 生物ビルドアップの分布はHöfling and Scott (2002)およびJohnson *et al.* (2002)を改変. 但し, ここでいう生物ビルドアップは「固着性の底生生物を中心に形成された, 側方に不連続な堆積体」という意味で使用されており, 生物礁以外に“カキ礁”や海綿バイオストロームなどの堆積体が含まれるため, ビルドアップの分布は炭酸塩プラットフォームの分布範囲より広い範囲となっている. また, 本図のビルドアップの分布は, Aはチトニアン後期～バラングニアン前期, Bはバラングニアン後期～アプチアン前期, Cはアプチアン後期～セノマニアン中期, Dはセノマニアン後期～サントニアンをそれぞれまとめたものを使用. A: バラングニアン. Bosellini and Morsilli (1997)およびHöfling and Scott (2002)に基づく. B: アプチアン中頃. 溺死場所はMasse *et al.* (1995)およびHöfling and Scott (2002), 生存した場所はWilson *et al.* (1998)およびGrötsch *et al.* (1998)による. C: アルビアン後期. Fernández-Mendiola and García-Mondéja (1997)およびWilson *et al.* (1998)による. D: セノマニアン/チューロニアン境界. Masse *et al.* (1995)およびJohnson *et al.* (2002)に基づく.

におけるギョーの溺死が, 太平洋の赤道から南緯10度の範囲で起きたことを示し, 具体的な原因は不明であるが, 当時の赤道域は現在とは異なり, 高温で炭酸塩プラットフォームの形成には適していなかったとする説を提唱した (Jenkyns and Wilson, 1999).

このように様々なシナリオが提案されているが, 炭酸塩プラットフォームの溺死を説明するユニークな解は得られていない (井龍・松田, 1999).

白亜紀における造礁生物相の変化

炭酸塩プラットフォームを構成する主要な造礁生物は時代とともに変化しており, 一般に三畳紀の中期以降から現在に至るまでは六放サンゴと石灰藻が炭酸塩プラットフォームの主要な構成要素とされる (James and Bourque, 1992). これに対して, 白亜紀にはサンゴに替わり厚歯二枚貝 (rudist: ヒプリテス上科 (Hippuritacea)) と呼ばれる二枚貝が卓越した時期があった. 厚歯二枚貝は二枚の殻の間で形や大きさが著しく異なり, 巻貝, コップとそれにかぶさるふたのようにみえるものなど, 特異な形態を持つ

(図3). サンゴから厚歯二枚貝へという, 造礁生物相の変化は白亜紀中頃に起こったが, これは個々の OAEs のような短期間の事変を境に生じたものではなく, 白亜紀中頃の海洋条件の変化が長期にわたって複合的に作用したものとされている (Scott, 1995など).

白亜紀における厚歯二枚貝相の変化からみると, このグループ全体が絶滅した白亜紀最後期以外に, バラングニアン中頃, アプチアン中頃, C/T 境界の3つの時期に科や属レベルの絶滅を伴う交替の時期が認められる (図1). また, 厚歯二枚貝の絶滅と同時期に, 炭酸塩プラットフォームに生息する, 大型有孔虫オルビトリナ類などの底生有孔虫や石灰藻のカサノリ類 (dasycladales) にも, 属レベルの絶滅を伴う生物相の交替が生じている (Masse, 1989, 1993; Philip and Airaud-Crumiere, 1991). これらの時期は, いずれも炭酸塩プラットフォームが衰退する時期と一致し, 生物の交替もプラットフォームが溺死する期間の前後で生じている. さらに, これらの年代が OAEs とほぼ時期を同じくすることから, 無酸素事変がプラットフォームの生物相に強い影響を与えたとする考え方は相変わらず根強いものがある (Ross and Skelton, 1993; Höfling and Scott, 2002など).

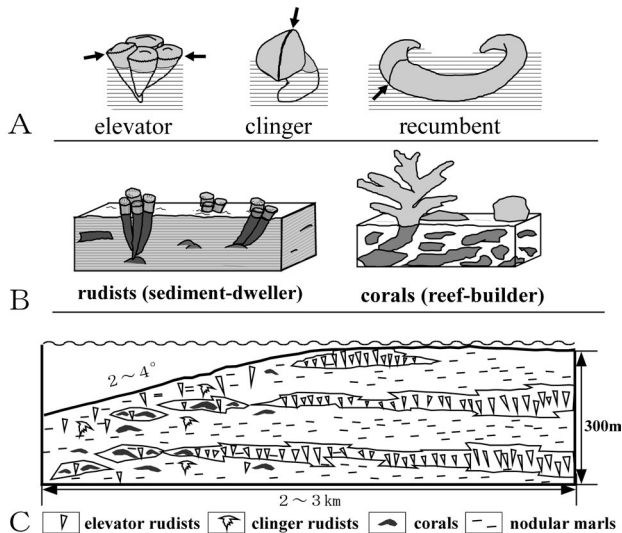


図3. 厚歯二枚貝の形態型と、白亜紀後期の炭酸塩プラットフォームの特徴 (Ross and Skelton, 1993; Gili *et al.*, 1995を改変)。

A: 厚歯二枚貝の代表的な形態と生息姿勢。厚歯二枚貝は、直立型 (elevator), 附着型 (clinger), 横臥型 (recumbent) の3つの形態型に区分されるが、いずれも堆積物表面、もしくは殻の一部を堆積物中に埋没させた状態で生息したと推定される。厚歯二枚貝は一般に著しい不等殻であり、二枚の殻の境界を矢印で示した。

B: 厚歯二枚貝密集層とサンゴ礁の枠組 (framework) との比較。厚歯二枚貝は、炭酸塩プラットフォームの未固結堆積物上での生活様式に適応しており、六放サンゴのような枠組は構築しなかった。

C: 厚歯二枚貝を中心としたプラットフォームの模式図 (スペイン北部のサントニアン期の例)。厚歯二枚貝は枠組を形成しないため、白亜紀後期のプラットフォームには、その外縁にサンゴ礁の礁斜面に相当する急角度の部分が存在しないことが多い。この時期には、サンゴは厚歯二枚貝が密集する部分とは異なる環境に生息していた。

OAEsと炭酸塩プラットフォームの溺死の同時性

既に述べたように、バランギニアン、アプチアン、C/T境界の3つの時期には、炭酸塩プラットフォームの溺死、造礁生物相の交替、OAEsの3つがほぼ同時に生じている可能性がある。ここでは、これらの同時性および関連を検討する。

バランギニアン

従来の研究では、バランギニアンにはOAEは生じていないとみなされていた (Arthur *et al.*, 1990など)。しかし、バランギニアン後期 (石灰質ナノ化石帯 *Calcicalathina oblongata* 帯) には、“バランギニアン炭素同位体イベント”とよばれる炭酸塩岩の炭素同位体比の正のシフトが認められる (Lini *et al.*, 1992)。ここでは、陸源有機物の濃集や石灰質ナノ化石の群集変化が起こっている (Bersezio *et al.*, 2002)。また、バランギニアン前期の後半には浮遊性微化石カルピオネラ類 (calpionellids) の多様性が著しく減少する (Reháková and Michalik, 1997)。これらのことから、バランギニアン前期の終わりからバランギニアン後期にかけてOAEに類似した事変が生じた可能性は高い。

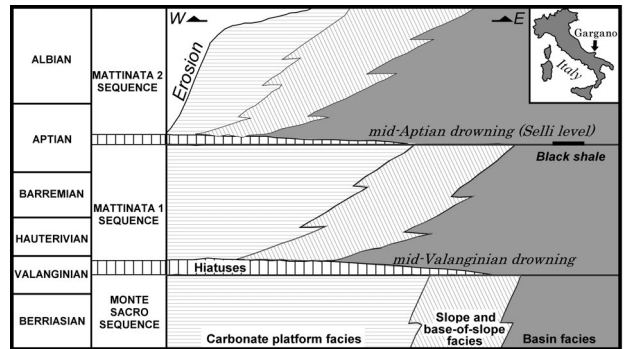


図4. イタリア・ガルガーノ地域における、白亜紀前期の年代層序概念図 (Bosellini *et al.*, 1999を改変)。炭酸塩プラットフォームの溺死がバランギニアン中頃とアプチアン中頃に生じており、アプチアン中頃の溺死と遠洋性堆積物中の黒色頁岩の堆積はほぼ同時に起こった。

しかし、これらが認められたのはいずれも遠洋性の堆積物中であり、炭素同位体比の正のシフトなどが、炭酸塩プラットフォームで確認されている事例はない。バランギニアン中頃の炭酸塩プラットフォームの溺死は、北アメリカ東岸からアラビア東部の広範囲にわたって知られ、また引き続きバランギニアン後期はプラットフォームの発達が著しく悪い時期である (Bosellini and Morsilli, 1997)。スイスのヘルヴェティア (Helvetia) 地域の炭酸塩プラットフォームでは、バランギニアン中頃の溺死の直前に、礫性のサンゴウーライト相から、礫性要素を含まないウミュリーコケムシ相への変化が生じており、溺死前に浅海地域で栄養塩が増加したことを示すと解釈され、溺死の原因を検討する上で注目される (Föllmi *et al.*, 1994)。しかし、この地域ではプラットフォームの溺死の開始は、炭素同位体の正のシフトにやや先行するとされ、炭素同位体イベントと炭酸塩プラットフォームの溺死時期との同時性は十分には検証されていない。

アプチアン

アプチアンの炭酸塩プラットフォームの溺死に関しては、イタリアのカルガーノ (Gargano) 地域で検証することができる (図4)。ここでは、アプチアン前期の炭酸塩堆積物が、アプチアン前期/後期境界付近 (石灰質ナノ化石帯 *Chiastozygus litterarius* 帯上部から *Parhabdololithus angustus* 帯下部に対比される) のマール質石灰岩、石灰岩からなる遠洋性堆積物に覆われる (Graziano, 1999)。このとき、同地域の深海相では黒色頁岩が堆積している (Luciani *et al.*, 2001)。この地域のプラットフォームの最上部 (前期アプチアンの後期) には大型有孔虫のオルビトリナ類とカキ類に富む堆積物がみられる。同様の堆積物は、地中海全域にも広範囲に認められており、“*Palorbitolina* 相”もしくは“*Orbitolina* 層準”とよばれている。このオルビトリナ類に富む堆積物は、海水の栄養塩が急激に増加した結果生じたと考えられている (Vilas *et al.*, 1995)。

このように、海水の富栄養化、炭酸塩プラットフォーム

の溺死，黒色頁岩の堆積時期の3つがほぼ同時に起こっており，アプチアンの溺死とOAE1a (Selli level) が関連していると考えても間違いなさそうである (Graziano 1999; Luciani *et al.*, 2001). しかし，これらの事変がほぼ同時に生じる具体的なメカニズムは今のところ明らかにされていない。

ところが，このOAE1aの時期にプラットフォームの溺死が生じていない事例も報告されている。一つは，国際深海掘削計画 (Ocean Drilling Program) の第143次航海で掘削された北西太平洋のレゾリューション・ギョーで，ここでは，炭酸塩堆積物中に炭素同位体比の明瞭な正のシフトと有機物に富んだ堆積物（全有機炭素含有量が最大34%）がみられるが，溺死は生じておらず，プラットフォームの形成は持続した (Jenkyns, 1995; Baudin, 1996). また，ギリシャとアラブ首長国連邦の炭酸塩プラットフォームでも，炭酸塩岩の炭素同位体比の正のシフトがみられるが，溺死は起こっていない (Grötsch *et al.*, 1998).

このように，OAE1aの際には，溺死した炭酸塩プラットフォームと，生き延びたプラットフォームの両者が存在する。

C/T境界

C/T境界では，炭酸塩プラットフォームの溺死とOAE 2とよばれる無酸素事変がほぼ同時に生じている。たとえば，クロアチアのアドリア海沿岸の白亜系の炭酸塩岩は，厚歯二枚貝などを含む浅海相が主体を占めるが，C/T境界付近になると，アンモナイト，浮遊性有孔虫などの外洋性生物の化石を産出する層が挟在する (Polšak, 1965; Gušić and Jelaska, 1993など)。この層準は有機物に富み（希に全有機炭素含有量10~20%），炭酸塩岩の炭素同位体比は正のシフトを示すことから，OAE2に対比された (Jenkyns, 1991; Davey and Jenkyns, 1999)。また，スペイン北部のピレネー山地でも，C/T境界で炭素同位体比の正のシフトとプラットフォームの溺死がほぼ同時に起こっている (Drzewiecki and Simo, 1997)。但し，ここでは，境界の直上にはコンデンス堆積物と考えられる棘皮動物に富む浅海性石灰岩が重なり，さらにこの上位にカルシスフェア (calcsphere) に富む遠洋性石灰岩が載る。

しかし，それ以外の多くの地域にみられるC/T境界では，炭酸塩プラットフォームの溺死は認められるものの，貧酸素環境の存在を示唆する堆積物はみつからないことが多い (Philip and Airaud-Crumiere, 1991)。

Jenkyns (1991) は，海水準の上昇に伴い，貧酸素水塊が炭酸塩プラットフォームまで達して，溺死を引き起こし，有機物に富む石灰岩を堆積させたと考えている。これに対して，それ以外の研究者たちは，プラットフォームの溺死は，必ずしも貧酸素水塊の影響を直接に受けているわけではないと推定している。

たとえば，Drzewiecki and Simo (1997) は次のような仮説を提唱した。セノマニアン末期には海水準の上昇に伴っ

て海洋の一次生産が増加し，浅海では富栄養な環境を好むカルシスフェアが豊富になった。富栄養の条件下では，カプリナ科の厚歯二枚貝などの造礁生物の成長が妨げられ，絶滅が引き起こされた。これらの造礁生物の絶滅により，浅海域における炭酸塩の生産が減少し，プラットフォームの溺死が起こった。一方，生物生産の増加により，遠洋域は貧酸素環境となり，有機物に富む堆積物が形成された。このシナリオは，海水準上昇だけではなく，さまざまな要因を組み合わせて，C/T境界での炭酸塩プラットフォームの溺死や黒色頁岩の堆積といった現象を統一的に説明しようとするものであるが，他地域でもこのシナリオが成立するのかどうか，今後の検証が必要である。

まとめ

白亜紀の温室地球では，広大な炭酸塩プラットフォームが発達した一方，炭酸塩プラットフォームの汎世界的な溺死が9回も起こった。また，白亜紀の厚歯二枚貝，底生有孔虫，石灰藻などの造礁生物相の変遷をみると，3回（バランギニアン中頃，アプチアン中頃，C/T境界）の大規模な交替が認められ，これらはプラットフォームの汎世界的な溺死時期と一致する。

炭酸塩プラットフォーム直上の遠洋性堆積物の時代決定や炭素同位体層序の適用などによって，上記の3回のプラットフォームの汎世界的な溺死時期は，バランギニアン炭素同位体イベント，OAE1a，OAE2とほぼ一致することが明らかとなり，両者間に何らかの因果関係が想定される。しかし，OAE1aの時期には，プラットフォーム堆積物中にOAEに対比される層準が認められるにもかかわらず，プラットフォームは溺死せずに，継続して発達した事例もあり，必ずしも全てのプラットフォームが溺死したわけではない。

今後，多様な層位学的データを統合し，炭酸塩プラットフォームと深海の両者の堆積物に記録された事変を対比することによって，OAEsが造礁生物相の交替や炭酸塩プラットフォームの溺死とどのように関連するかが解明されるものと期待される。

謝辞

この論文は，日本古生物学会第152回例会で開催されたシンポジウム「白亜紀海洋無酸素事変の解明」の中で講演した内容をもとにしたものである。シンポジウム世話人の方々（西弘嗣，平野弘道，北里洋，川辺文久の4氏）には本論文を発表する機会を与えていただいた。また，クレイド古生物学研究所の早川浩司氏と金沢大学の長谷川卓氏には，海洋無酸素事変についての基礎的な文献を教えていただいた。プレジジョン・ストラティグラフィ・アソシエイツ (Precision Stratigraphy Associates) の Robert W. Scott 博士には英文原稿をチェックしていただいた。東北大

学の井龍康文氏、九州大学の西 弘嗣氏からは、粗稿を校閲していただくとともに、建設的な御指摘・御意見をいただき、論文を改善する上で非常に有益であった。シンポジウム講演に際して、多数の方から貴重な御意見をいただいた。以上の方々に厚くお礼を申しあげる。

文献

- Arthur, M. A., Jenkyns, H. C., Brumsack, H.-J. and Schlanger, S. O., 1990. Stratigraphy, geochemistry, and paleoceanography of organic carbon-rich Cretaceous sequences. In Ginsburg, R. N. and Beaudoin, B., eds., *Cretaceous Resources, Events and Rhythms. Background and Plans for Research*, NATO ASI series. Series C: Mathematical and physical sciences, **304**, 75-119. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Baudin, F., 1996. Enregistrement de l'événement anoxique Aptien inférieur dans les faciès péritidaux du Guyot Resolution (Océan Pacifique NW). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Série IIa - Sciences de la Terre et des plaques*, **323**, 221-228.
- Bersezio, R., Erba, E., Gorza, M. and Riva, A., 2002. Berriasian-Aptian black shales of the Maiolica formation (Lombardian Basin, Southern Alps, Northern Italy): local to global events. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **180**, 253-275.
- Bosellini, A. and Morsilli, M., 1997. A Lower Cretaceous drowning unconformity on the eastern flank of the Apulia Platform (Gargano Promontory, southern Italy). *Cretaceous Research*, **18**, 51-61.
- Bosellini, A., Morsilli, M. and Neri, C., 1999. Long-term event stratigraphy of the Apulia platform margin (Upper Jurassic to Eocene, Gargano, southern Italy). *Journal of Sedimentary Research*, **69**, 1241-1252.
- Channell, J. E. T., Erba, E. and Lini, A., 1993. Magnetostratigraphic calibration of the Late Valanginian carbon isotope event in pelagic limestones from Northern Italy and Switzerland. *Earth and Planetary Science Letters*, **118**, 145-166.
- Davey, S. D. and Jenkyns, H. C., 1999. Carbon-isotope stratigraphy of shallow-water limestones and implications for the timing of Late Cretaceous sea-level rise and anoxic events (Cenomanian-Turonian of the peri-Adriatic carbonate platform, Croatia). *Eclogae geologicae Helvetiae*, **92**, 163-170.
- Drzewiecki, P. A. and Simo, J. A., 1997. Carbonate platform drowning and oceanic anoxic events on a mid-Cretaceous carbonate platform, south-central Pyrenees, Spain. *Journal of Sedimentary Research*, **67**, 698-714.
- Elder, W. P., 1989. Molluscan extinction patterns across the Cenomanian-Turonian stage boundary in the Western Interior of the United States. *Paleobiology*, **15**, 299-320.
- Fernández-Mendiola, P. A. and García-Mondéjar, J., 1997. Isolated carbonate platform of Caniego, Spain: A test of the latest Albian worldwide sea-level changes. *Geological Society of America Bulletin*, **109**, 176-194.
- Föllmi, K. B., Weissert, H., Bispin, M. and Funk, H., 1994. Phosphogenesis, carbon-isotope stratigraphy, and carbonate-platform evolution along the Lower Cretaceous northern Tethyan margin. *Geological Society of America Bulletin*, **106**, 729-746.
- Gili, E., Masse, J.-P. and Skelton, P. W., 1995. Rudists as gregarious sediment-dwellers, not reef-builders, on Cretaceous carbonate platforms. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **118**, 245-267.
- Graziano, R., 1999. The Early Cretaceous drowning unconformities of the Apulia carbonate platform (Gargano Promontory, southern Italy): local fingerprints of global palaeoceanographic events. *Terra Nova*, **11**, 245-250.
- Grigg, R. W., 1982. Darwin Point: a threshold for atoll formation. *Coral Reefs*, **1**, 29-34.
- Grötsch, J., Billing, I. and Vahrenkamp, V., 1998. Carbon-isotope stratigraphy in shallow-water carbonates: implications for Cretaceous black-shale deposition. *Sedimentology*, **45**, 623-634.
- Grötsch, J., Schroeder, R., Noe, S. and Flügel, E., 1993. Carbonate platforms as recorders of high-amplitude eustatic sea-level fluctuations: the late Albian *appenninica*-event. *Basin Research*, **5**, 197-212.
- Gusić, I. and Jelaska, V., 1993. Upper Cenomanian-Lower Turonian sea-level rise and its consequences on the Adriatic-Dinaric carbonate platform. *Geologische Rundschau*, **82**, 676-686.
- Hallock, P. and Schlager, W., 1986. Nutrient excess and the demise of coral reefs and carbonate platforms. *Palaios*, **1**, 389-398.
- Höfling, R. and Scott, R. W., 2002. Early and Mid-Cretaceous buildups. In Kiessling, W., Flügel, E. and Golonka, J., eds., *Phanerozoic Reef Patterns*, SEPM Special Publication, (72), 521-548. Tulsa, Oklahoma.
- 井龍康文・松田博貴, 1999. 浅海堆積物掘削に関する提言—炭酸塩堆積物に関して—. 月刊地球, **21**, 735-741.
- James, N. P. and Bourque, P.-A., 1992. Reefs and mounds. In Walker, R. G. and James, N. P., eds., *Facies Models: response to sea level change*, 323-347. Geological Association of Canada, St. John's, Newfoundland.
- Jenkyns, H. C., 1991. Impact of Cretaceous sea level rise and anoxic events on the Mesozoic carbonate platform of Yugoslavia. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, **75**, 1007-1017.
- Jenkyns, H. C., 1995. Carbon-isotope stratigraphy and paleoceanographic significance of the Lower Cretaceous shallow-water carbonates of Resolution Guyot, Mid-Pacific Mountains. In Winterer, E. L., Sager, W. W., Firth, J. V. and Sinton, J. M., eds., *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, **143**, 99-104. Ocean Drilling Program, College Station, Texas.
- Jenkyns, H. C., 1999. Mesozoic anoxic events and palaeoclimate. *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie, Teil I: Allgemeine, Angewandte, Regionale und Historische Geologie*, **1997**, 943-949.
- Jenkyns, H. C. and Wilson, P. A., 1999. Stratigraphy, paleoceanography, and evolution of Cretaceous Pacific guyots: relics from a greenhouse Earth. *American Journal of Sciences*, **299**, 341-392.
- Johnson, C. C., Sanders, D., Kauffman, E. G. and Hay, W. W., 2002. Patterns and processes influencing Upper Cretaceous reefs. In Kiessling, W., Flügel, E. and Golonka, J., eds., *Phanerozoic Reef Patterns*, SEPM Special Publication, (72), 549-585. Tulsa, Oklahoma.
- Leckie, R. M., Bralower, T. and Cashman, R., 2002. Oceanic anoxic events and plankton evolution: Biotic response to tectonic forcing during the mid-Cretaceous. *Paleoceanography*, **17**, 10.1029/2001PA000623.
- Lini, A., Weissert, H. and Erba, E., 1992. The Valanginian carbon isotope event: a first episode of greenhouse climate conditions during the Cretaceous. *Terra Nova*, **4**, 374-384.
- Luciani, V., Cobianchi, M. and Jenkyns, H. C., 2001. Biotic and geochemical response to anoxic events: the Aptian pelagic succession of the Gargano Promontory (southern Italy). *Geological Magazine*, **138**, 277-298.
- Masse, J.-P., 1989. Relations entre modifications biologiques et phénomènes géologiques sur les plates-formes carbonatées du domaine périméditerranéen au passage Bédoulien-Gargasien. In Cotillon, P., ed., *Les Événements de la Partie Moyenne du Crétacé (Aptien à Turonien)*, Geobios, mémoire spécial (11), 279-294. Université Claude-Bernard, Lyon.
- Masse, J.-P., 1993. Early Cretaceous Dasycladales biostratigraphy from Provence and adjacent regions (South of France, Switzerland, Spain). A reference for Mesogean correlations. In Barattolo, F., De Castro, P. and Parente, M., eds., *Studies on Fossil Benthic Algae*, Bollettino della Società Paleontologica Italiana, Volume Speciale (1), 311-324. Modena.
- Masse, J.-P., 1995. Lower Cretaceous rudist biostratigraphy of southern France -a reference for Mesogean correlations. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, **12**, 236-256.
- Masse, J.-P., Philip, J. and Camoin, G., 1995. The Cretaceous Tethys. In Nairn, A. E. M., Ricou, L.-E., Vrielynck, B. and Dercourt, J., eds., *The Ocean Basins and Margins, Volume 8: The Tethys Ocean*, 215-236. Plenum Press, New York.
- Matthews, J. L., Heezen, B. C., Catalano, R., Coogan, A., Tharp, M., Natland, J. and Rawson, M., 1974. Cretaceous drowning of reefs on Mid-Pacific and Japanese Guyots. *Science*, **184**, 462-464.
- Philip, J. M. and Airaud-Crumiere, C., 1991. The demise of the rudist-bearing carbonate platforms at the Cenomanian/Turonian boundary: a

- global control. *Coral Reefs*, **10**, 115-125.
- Polšak, A., 1965. Geologija južne Istre s osobitim obzirom na biostratigrafiju krednih naslaga [Géologie de l'Istrie méridionale spécialement par rapport à la biostratigraphie des couches crétacées]. *Geološki vjesnik*, **18**, 415-509.
- Reháková, D. and Michalik, J., 1997. Evolution and distribution of calpionellids -the most characteristic constituents of Lower Cretaceous Tethyan microplankton. *Cretaceous Research*, **18**, 493-504.
- Ross, D. J. and Skelton, P. W., 1993. Rudist formations of the Cretaceous: a palaeoecological, sedimentological and stratigraphical review. In Wright, V. P., ed., *Sedimentology Review 1*, 73-91. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Sager, W. W., Winterer, E. L., Firth, J. V., et al., 1993. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports*, **143**, 724p. Ocean Drilling Program, Colledge Station, Texas.
- Schlager, W., 1981. The paradox of drowned reefs and carbonate platforms. *Geological Society of America Bulletin*, **92**, 197-211.
- Schlanger, S. O. and Jenkyns, H. C., 1976. Cretaceous oceanic anoxic events: causes and consequences. *Geologie en Mijnbouw*, **55**, 179-184.
- Scott, R. W., 1995. Global environmental controls on Cretaceous reefal ecosystems. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **119**, 187-199.
- Simo, J. A. T., Scott, R. W. and Masse, J.-P., eds., 1993. *Cretaceous Carbonate Platforms*. American Association of Petroleum Geologists, Memoir (56), 479p. Tulsa, Oklahoma.
- Vilas, L., Masse, J.-P. and Arias, C., 1995. *Orbitolina* episodes in carbonate platform evolution: the early Aptian model from SE Spain. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **119**, 35-45.
- Weissert, H., Lini, A., Föllmi, K. B. and Kuhn, O., 1998. Correlation of Early Cretaceous carbon isotope stratigraphy and platform drowning events: a possible link? *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **137**, 189-203.
- Wilson, P. A., Jenkyns, H. C., Elderfield, H. and Larson, R. L., 1998. The paradox of drowned carbonate platforms and the origin of Cretaceous Pacific guyots. *Nature*, **392**, 889-894.
- Winterer, E. L. and Metzler, C. V., 1984. Origin and subsidence of guyots in Mid-Pacific Mountains. *Journal of Geophysical Research*, **89**, 9969-9979.

(2003年4月29日受付, 2003年7月15日受理)

